

*А. С. МАЗМАНИШВИЛИ, Н. Г. РЕШЕТНЯК***УПРАВЛЕНИЕ ПОПЕРЕЧНЫМИ РАЗМЕРАМИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА  
В СОЛЕНОИДАЛЬНОМ ПОЛЕ МАГНЕТРОННОЙ ПУШКИ**

Представлены результаты исследования по формированию поперечных размеров электронного пучка магнетронной пушкой с вторичноэмиссионным катодом в диапазоне напряжений 25..90 кВ. Проведены исследования процессов формирования электронных пучков в источниках электронов с холодными металлическими катодами, работающими в режиме вторичной эмиссии. В качестве источника электронов используется магнетронная пушка. Принцип работы таких пушек основан на обратной бомбардировке катода электронами, возвращаемыми магнитным полем, образовании электронного облака вблизи катода и формировании пучка в скрещенных электрическом и магнитном полях. Их основным отличием от термоэмиссионных пушек является большая плотность тока с единицы поперечной площади катода  $\sim 50$  А/см<sup>2</sup> и большой срок службы. Поэтому поиск и исследование источников электронов с большим сроком службы является актуальной задачей. На базе магнетронной пушки с вторичноэмиссионным катодом создан ускоритель электронов, в котором используется осевой электронный пучок для облучения металлических мишеней и внутренней цилиндрической поверхности с помощью радиального электронного пучка. В работе представлены опытные данные и результаты моделирующих расчетов по формированию и управлению распределению электронного пучка магнетронной пушкой с вторичноэмиссионным катодом при движении в соленоидальном магнитном поле. Исследована зависимость формирования радиальных размеров электронного пучка от амплитуды и градиента соленоидального магнитного поля в пушке, который нарастает или спадает в канале транспортировки пучка. Приводятся результаты численного моделирования по движению трубчатого электронного потока в магнитном поле соленоида. На основе модели движения электронного потока рассмотрены характеристики результирующего электронного пучка. Показана возможность регулировки диаметра пучка путем вариации управляющего магнитного поля. Полученные численные зависимости согласуются с экспериментальными результатами для магнитного поля с большим градиентом. Изучена возможность управления поперечными размерами пучка.

**Ключевые слова:** электронный пучок, магнетронная пушка, математическое моделирование, дифференциальное уравнение движения, соленоидальное магнитное поле, управление поперечными размерами пучка.

*О. С. МАЗМАНИШВИЛИ, М. Г. РЕШЕТНЯК***УПРАВЛІННЯ ПОПЕРЕЧНИМИ РОЗМІРАМИ ЕЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В  
СОЛЕНОЇДАЛЬНОМУ ПОЛІ МАГНЕТРОННОЇ ГАРМАТИ**

Представлено результати дослідження щодо формування поперечних розмірів электронного пучка магнітної гарматою з вторинноемісійним катодом в діапазоні напруги 25..90 кВ. Проведено дослідження процесів формування електронних пучків в джерелах електронів з холодними металевими катодами, що працюють в режимі вторинної емісії. Як джерело електронів використовується магнетронна гармата. Принцип роботи таких гармат заснований на зворотному бомбардуванню катода електронами, що повертаються магнітним полем, створенні електронної хмари поблизу катода і формуванні пучка в скрещених електричному і магнітному полях. Їх основною відмінністю від термоемісійних гармат є велика щільність струму з одиниці поперечної площі катода  $\sim 50$  А/см<sup>2</sup> і великий термін служби. Тому пошук і дослідження джерел електронів з великим терміном служби є актуальним завданням. На базі магнетронної гармати з вторинноемісійним катодом створений прискорювач електронів, в якому використовується осовий електронний пучок для опромінення металевих мішеней і внутрішньої циліндричної поверхні за допомогою радіального електронного пучка. В роботі представлені експериментальні дані і результати, що моделюють розрахунки по формуванню і управлінню розподілу електронного пучка магнетронної гарматою з вторинноемісійним катодом при русі в соленоїдальному магнітному полі. Досліджено залежність формування радіальних розмірів вторинноемісійного пучка від амплітуди та градієнта соленоїдального магнітного поля в гарматі, який наростає або спадає в каналі транспортування пучка. Наводяться результати чисельного моделювання по руху трубчастого електронного потоку в магнітному полі соленоида. На основі моделі руху електронного потоку розглянуті характеристики результирующего електронного пучка. Показана можливість регулювання діаметра пучка шляхом варіації керуючого магнітного поля. Приведено результати чисельного моделювання за рухом трубчатого електронного потоку в магнітному полі соленоида. Досліджена можливість управління поперечними розмірами пучка.

**Ключові слова:** електронний пучок, магнетрон гармата, математичне моделювання, диференціальне рівняння руху, соленоїдальне магнітне поле, управління поперечних розмірів пучок..

*O. S. MAZMANISHVILI, N. G. RESHETNEAK***CONTROLLING THE TRANSVERSE DIMENSIONS OF THE ELECTRON BEAM IN THE  
SOLENOIDAL FIELD OF A MAGNETRON GUN**

The results of the study on the formation of transverse dimensions of an electron beam by a magnetron gun with a secondary emission cathode in the voltage range of 25..90 kV are presented. Investigations of the formation of electron beams in electron sources with cold metal cathodes operating in the secondary emission regime are carried out. The electron source is a magnetron gun. The principle of operation of such guns is based on the reverse bombardment of the cathode by electrons returned by the magnetic field, the formation of an electron cloud near the cathode and the formation of a beam in crossed electric and magnetic fields. Their main difference from thermionic guns is the large current density from a unit of the cathode's cross-sectional area  $\sim 50$  A/cm<sup>2</sup> and a long service life. Therefore, the search and investigation of electron sources with a long service life is an urgent task. On the basis of a magnetron gun with a secondary-emission cathode, an electron accelerator is created in which an axial electron beam is used to irradiate metal targets and the inner cylindrical surface with a radial electron beam. The article presents the experimental data and the results of modeling calculations on the formation and control of the electron beam distribution by a magnetron gun with a secondary-emission cathode in motion in a solenoidal magnetic field. The dependence of the formation of the radial dimensions of the electron beam on the amplitude and gradient of the solenoidal magnetic field in the gun, which grows or falls in the channel of the beam transport, is studied. The results of numerical simulation of the motion of a tubular electron beam in a magnetic field of a solenoid are presented. Based on the motion model of the electron beam, the characteristics of the resultant electron beam are considered. It is shown that the diameter of the beam can be adjusted by varying the control magnetic field. The results of numerical modeling on the motion of a tubular electron flux in a magnetic field of a solenoid are given. The possibility of controlling the transverse dimensions of the beam is studied.

**Keywords:** electron beam, magnetron gun, mathematical modeling, differential equation of motion, solenoidal magnetic field, control of transverse beam dimensions.

**Введение.** Электронные пучки различной конфигурации и интенсивности [1-3] применяются в высоковольтной импульсной СВЧ электронике, электронно-лучевых технологиях, ускорительной технике и т.д. [4-6]. В ННЦ «ХФТИ» проводятся исследования процессов формирования электронных пучков в источниках электронов с холодными металлическими катодами, работающими в режиме вторичной эмиссии. В качестве источника электронов используется магнетронная пушка. Принцип работы таких пушек основан на обратной бомбардировке катода электронами, возвращаемыми магнитным полем, образовании электронного облака вблизи катода и формировании пучка в скрещенных электрическом и магнитном полях. Их основным отличием от термоэмиссионных пушек является большая плотность тока с единицы поперечной площади катода  $\sim 50$  А/см<sup>2</sup> и большой срок службы. Поэтому поиск и исследование источников электронов с большим сроком службы является актуальной задачей. На базе магнетронной пушки с вторичноэмиссионным катодом создан ускоритель электронов, в котором используется осевой электронный пучок для облучения металлических мишеней и внутренней цилиндрической поверхности с помощью радиального электронного пучка [7–10].

В настоящей работе изучена возможность управления поперечными размерами электронного пучка с помощью соленоидального поля магнетронной пушки.

**Экспериментальная установка и методика исследований.** На ускорителе электронов на основе магнетронной пушки с вторичноэмиссионным катодом проведены исследования динамики электронного пучка и измерению его параметров при движении частиц в канале транспортировки.

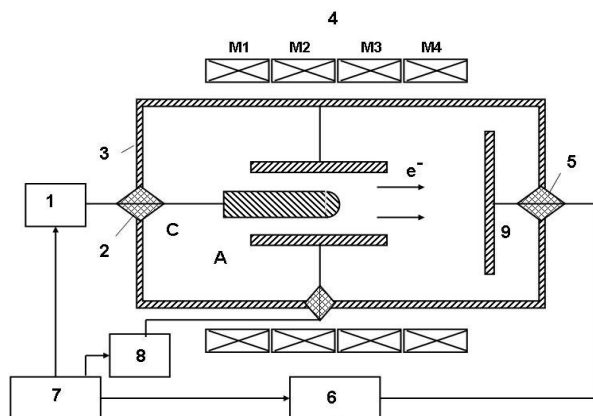


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки.

1 – высоковольтный импульсный генератор, 2, 5 – изоляторы, 3 – вакуумная камера, 4 – соленоид, M1÷M4 – катушки соленоида, 6 – измерительная система, 7 – блок синхронизации, 8 – генератор запускающего импульса, 9 – мишень, C – катод, A – анод

Блок-схема установки приведена на рис. 1. Для питания магнетронной пушки использовался импульсный генератор (1) с амплитудой плоской части импульса 20...100 кВ, длительностью 50...10 мкс и частотой следования 3...10 Гц, который подается на катод пушки. В схеме генератора использовался пол-

ный разряд накопительной емкости на трансформатор через тиратрон. Запуск вторичноэмиссионного разряда в пушке осуществляется импульсом напряжения с крутым спадом, подаваемым на анод пушки, который создавался генератором (8) с амплитудой напряжения до 15 кВ. Источник электронов (C – катод, A – анод) размещается в вакуумном объеме (3). Для получения электронного пучка использовались магнетронная пушка с диаметром анода 78 мм и диаметром катода 36 мм. Магнитное поле для генерации и транспортировки электронного пучка создается соленоидом (4), состоящим из 4 секций (катушек), питание которых происходило от источников постоянного тока. Регулируя ток в катушках, можно было изменять амплитуду и продольное распределение магнитного поля вдоль оси магнетронной пушки и канала транспортировки пучка, что позволяло получать различные режимы формирования электронного пучка. Мишень располагалась на различных расстояниях от среза анода ( $1,5 \div 13,5$  см) и также служила для измерения тока пучка в осевом направлении. Обработка результатов измерений токов пучка и импульса напряжения производилось с помощью измерительной системы (6). Погрешность измерения составляет 1...2 %. Поперечные размеры пучка измеряли путем получения отпечатка на металлических мишенях.

Для выполнения моделирующих расчетов построено программа, позволяющая рассчитать траектории движения электронов в заданном магнитном поле [11]. Устойчивость численного алгоритма решения связана с шагом  $\Delta s$  решения, где  $s=ct$  ( $c$  – скорость света,  $t$  – текущее время), и ларморовским параметром задачи  $\mu$ . Таким образом, при выполнении условия  $\mu\Delta s \ll 1$  можно ожидать сходимость численного решения системы к его аналитическому аналогу. Условие  $\mu\Delta s \ll 1$  будет выполняться, если  $\Delta s \ll 0.0001$  м. С вычислительной точки зрения задача может быть сформулирована как задача Коши [12]. Результатом будет являться траектория электрона, отвечающая начальным условиям. Потребовав выполнения заданного условия (прохождение канала транспортировки пучка) можно, зафиксировав значения всех компонент траектории электрона, сформировать результирующий пучок и изучить его свойства.

**Результаты эксперимента и численного моделирования и их обсуждение.** Проведенные исследования по формированию электронного пучка и измерению его параметров от напряжения на катоде в диапазоне 20...90 кВ.

На рис. 2 приведена фотография двух отпечатков потока электронов при его попадания на алюминиевую мишень, расположенную на расстоянии 7 см от среза анода.

Отпечатки получены для полей  $H_{\max}$  и  $H_{\min}$ . При этом конфигурация поля  $H_{\max}$  характеризуется положительным градиентом, а конфигурация поля  $H_{\min}$  – отрицательным за срезом анода (см. рис. 3).

В проведенных исследованиях для обоих распределений магнитного поля  $H_{\max}$  и  $H_{\min}$  получена достаточно хорошая однородность азимутального распределения тока электронного пучка. Это было

подтверждено результатами экспериментов, выполненных с использованием 8-секционного цилиндра Фарадея, который размещался в месте расположения мишени.



Рис. 2. Отпечатки электронного пучка на алюминиевой мишени. 1 – нарастающее магнитное поле  $H_{\max}$ , 2 – спадающее магнитное поле  $H_{\min}$

Численное моделирование осуществлялось для обеих полей  $H_{\max}$  и  $H_{\min}$ , а также для набора промежуточных полей, которые с помощью параметра управления  $K$  задавались по формуле

$$H_K = H_{\min} + K(H_{\max} - H_{\min})/10, \quad (3)$$

что позволило промоделировать тенденции в динамике радиальных размеров пучка (см. рис. 4).

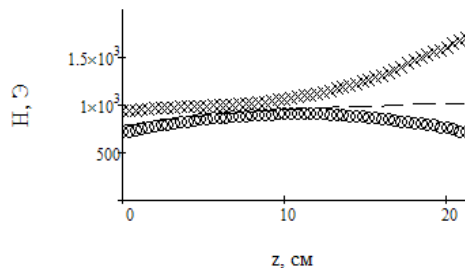


Рис. 3. Примеры конфигураций магнитного поля. Крестики – поле  $H_{\max}$  с положительным градиентом, кружочки – поле  $H_{\min}$  с отрицательным градиентом, пунктир – промежуточный случай  $H_0$

Выполнены измерения размеров электронного пучка на мишени. При напряжении на катоде 55 кВ и спадающем магнитном поле в области транспортировки пучка (рис. 3), кривая  $H_{\min}$  магнетронная пушка формирует в области мишени кольцевой электронный пучок с током 30 А и наружным диаметром 53 мм с толщиной стенки 3 мм. При нарастающем магнитном поле (рис. 3, кривая  $H_{\max}$ ) ток пучка уменьшался до 24 А, при этом наружный диаметр пучка уменьшился до 29,5 см с толщиной стенки 1,8 мм.

На рис. 5 показаны результаты численного моделирования движения электронов (объем выборки  $N=500$ ) в двух магнитных полях  $H_{\max}$  и  $H_{\min}$ . Из рис. 5 можно видеть динамику формирования распределений электронного пучка при его распространении вдоль оси  $z$  в канале транспортировки. Из рис. 5 сле-

дует, что электронный пучок по мере движения испытывает уменьшение своих радиальных размеров, что особенно хорошо выражено в случае поля  $H_{\max}$  с положительным градиентом.

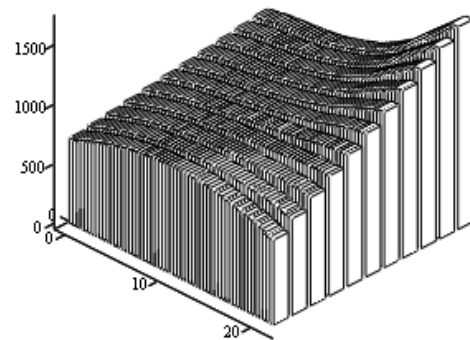


Рис. 4. Набор моделирующих распределений магнитных полей на интервале 20 см

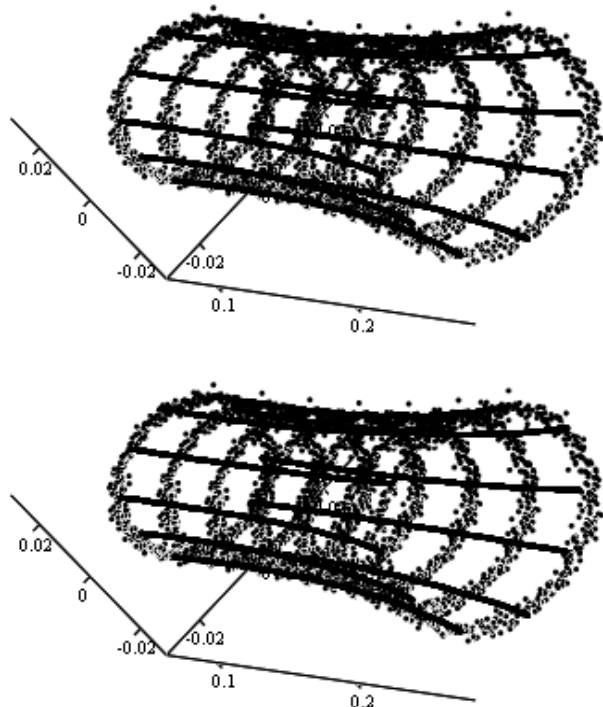


Рис. 5. Эскизы формирования распределения пучка при его движении вдоль оси магнитной системы. Сверху: поле  $H_{\min}$  с отрицательным градиентом, снизу: поле  $H_{\max}$  с положительным градиентом

На рис. 6 показана рассчитанная зависимость среднего радиального размера пучка  $R_{sr}$  от параметра управления  $K$  конфигурации магнитного поля. Из рисунка следует, что средний радиальный размер пучка  $R_{sr}$  достигает своего минимума  $MinR$  тем эффективнее, чем большим является градиент магнитного поля. Локализация точки достижения минимума с ростом  $K$  смещается вдоль оси  $z$  транспортировки системы.

На рис. 7 приведена полученная при моделировании зависимость минимального радиуса  $MinR$  от параметра управления  $K$  конфигурации магнитного

поля. Сопоставление радиусов отпечатков пучка на пролетном расстоянии  $z = 22,5$  см для нарастающего магнитного поля  $H_{\max}$  и спадающего магнитного поля  $H_{\min}$ , показанных на рис. 2, с зависимостями для среднего радиуса  $R_{\text{sr}}$  кольцевого электронного пучка, приведенными на рис. 6, дает возможность заключить о достаточно хорошем соответствии найденных значений.

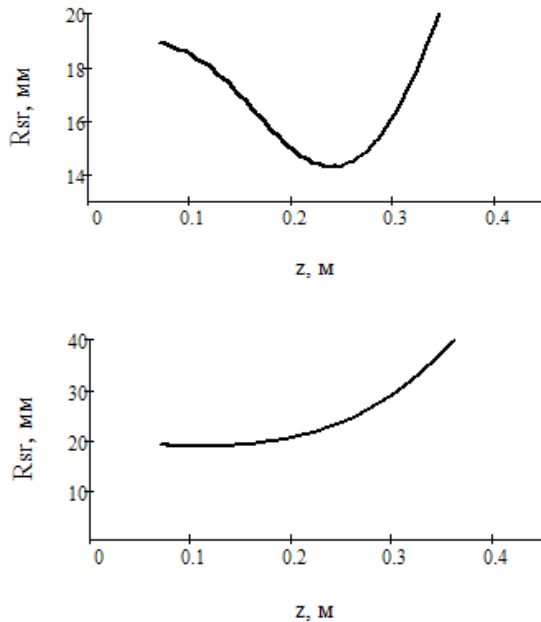


Рис. 6. Зависимость минимума среднего радиуса пучка  $R_{\text{sr}}$  от продольной длины  $z$ .  
Сверху – поле  $H_{\max}$ , снизу –  $H_{\min}$

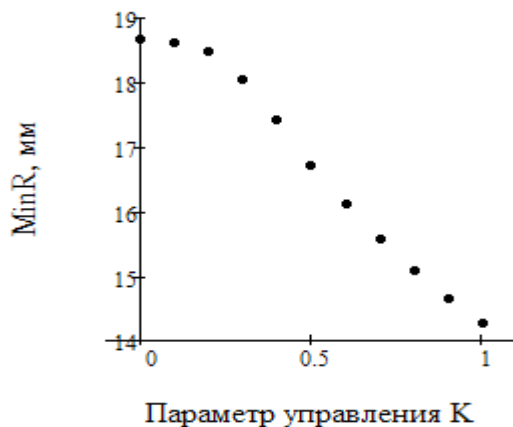


Рис. 7. Зависимость минимального радиуса  $\text{MinR}$  от параметра управления  $K$

Таким образом, увеличение градиента полного магнитного поля приводит к перестройке распределения электронов в конфигурационном пространстве, в частности, к сжатию распределения частиц в радиальном направлении.

Путем увеличения градиента магнитного поля можно регулировать плотность частиц в радиальном направлении вдоль длины трубы.

Результаты экспериментальных исследований

свидетельствуют о возможности устойчивого формирования электронного пучка в радиальном направлении магнетронной пушкой с холодным вторичноэмиссионным катодом в магнитном поле соленоида.

**Выводы.** В работе представлены опытные данные и результаты моделирующих расчетов по формированию и управлению распределению электронного пучка магнетронной пушкой с вторичноэмиссионным катодом при движении в соленоидальном магнитном поле. В исследованиях показана возможность устойчивого формирования радиального электронного пучка с энергией в десятки килоэлектронвольт в магнитном поле с положительным градиентом.

На основе модели движения электронного потока рассмотрены характеристики результирующего электронного пучка. Для различных конфигураций магнитного поля приводятся результаты моделирования по движению трубчатого электронного потока. Показана возможность регулировки диаметра пучка путем вариации управляющего магнитного поля. Полученные численные зависимости согласуются с экспериментальными результатами для магнитного поля с большим градиентом.

#### Список литературы

1. Пирс Дж. Р. *Теория и расчет электронных потоков*. Москва: Сов. радио, 1956. 254 с.
2. Алямовский И. В. *Электронные пучки и электронные пушки*. Москва: Сов. радио, 1966. 454 с.
3. Игнатенко В. П. Принципы формирования и фокусировки интенсивных пучков заряженных частиц. *Успехи физических наук*. 1961. Т. 73, № 2. С. 243–275.
4. Engelko V., Mueller G., Andreev A. et. Pulsed Electron Beam Facilities (GESA) for Surface Treatment. *Proceedings of the 10th international conference on applied charged particle accelerations in medicine and industry*. St.-Petersburg, 2001, pp. 412–417.
5. Garkusha O. V., Maslennikov S. P., Novozhilov A. E., Shkol'nikov E. Ya. A high-current accelerator of microsecond electrons for radiation-technological purposes. *Proceedings of the XI international meeting on the use charged particle accelerators in industry and medicine*. St.-Petersburg, Russia, 2005, pp. 126–128.
6. Vorogushin M. F., Glukhikh V. A., Manukyan G. Sh., Karpov D. A., Svin'in M. P., Ehngel'ko V. I., Yatsenko B. P. Beam and ion-plasma technologies. *Problems of atomic science and technology. Series "Physics of radiation effects and radiation materials science"*. 2002, no. 3, pp. 101–109.
7. Saveliev Y. M., Sibbet W., Parkes D. M. Self-excitation and characteristics of the crossed-fields emission electron source. *Review of scientific instruments*. 1999, vol. 70, no. 12, pp. 4502–4514.
8. Волколупов Ю. Я., Довбня А. Н., Закутин В. В. Генерация электронных пучков в магнетронном диоде с металлическим вторичноэмиссионным катодом. *Журнал теоретической физики*. 2001. Т. 71, вып. 7. С. 88–91.
9. Довбня А. Н., Решетняк Н. Г. Исследование формирования пучка в ускорителе электронов с вторичноэмиссионным источником. *Вісник «ХНУ»*. Сер.: «Ядра, частинки, поля». Харків, 2006. № 732, 2(30). С. 96–100.
10. Довбня А. Н., Закутин В. В., Лавриненко С. Д. Модификация поверхности циркония и сплава Zr 1%Nb электронным пучком ускорителя на основе магнетронной пушки. *ВАНТ. Серія «Фізика радіаційного матеріалознавства»*. 2011. № 2(72), вып. 97. С. 39–45.
11. Ayzatsky M. I., Dovbnya A. N., Mazmanishvili A. S., Reshetnyak N. G., Romas'ko V. P., Chertishchev I. A. Studies on formation of the radially-directed electron beam generated by the magnetron gun with a secondary emission cathode. *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations"*. 2016, issue 66, no. 3(103), pp. 11–16.
12. Хемминг Р. В. *Численные методы*. Москва: Наука, 1972. 303 с.

## References (transliterated)

1. Pirs Jh. P. *Teoriya i raschet elektronnykh potokov* [Theory and calculation of electron currents]. Moscow, Sov. Radio, 1956. 254 p.
2. Alyamovskiy S. V. *Elektronnye puchki i elektronnye pushki* [Electron beams and electron guns]. Moscow, Sov. radio Publ., 1966. 454 p.
3. Ignatenko V. P. *Principy formirovaniya i fokusirovki intensivnykh puchkov zaryazhennykh chastits* [The principles of formation and focusing of intense beams of charged particles]. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk* [The success of physical science]. 1961, vol. 73, no. 2, pp. 243–275.
4. Engelko V., Mueller G., Andreev A. et. Pulsed Electron Beam Facilities (GESA) for Surface Treatment. *Proceedings of the 10th international conference on applied charged particle accelerations in medicine and industry*. St.-Petersburg, 2001, pp. 412–417.
5. Garkusha O. V., Maslennikov S. P., Novozhilov A. E., Shkol'nikov E. Ya. A high-current accelerator of microsecond electrons for radiation-technological purposes. *Proc. of the XI international meeting on the use of charged particle accelerators in industry and medicine*. St.-Petersburg, Russia, 2005, pp. 126–128.
6. Vorogushin M. F., Glukhikh V. A., Manukyan G. Sh., Karpov D. A., Svin'in M. P., Ehngel'ko V. I., Yatsenko B. P. Beam and ion-plasma technologies. *Problems of atomic science and technology. Series "Physics of radiation effects and radiation materials science"*. 2002, no. 3, pp. 101–109.
7. Saveliev Y. M., Sibbet W., Parkes D. M. Self-excitation and characteristics of the crossed-fields emission electron source. *Review of Scientific Instruments*. 1999, vol. 70, no 12, pp. 4502–4514.
8. Volkolupov Yu. Ya., Dovbnya A. N., Zakutin V. V. Generatsiya elektronnykh puchkov v magnetronnom diode s metallicheskim vtorichniemissionnym katodom [Generation of electron beams in a magnetron diode with a metallic secondary-emission cathode]. *Zhurnal teoreticheskoy fiziki* [Journal theoretical physic]. 2001, vol. 71, no. 7, pp. 88–91.
9. Dovbnya A. N., Reshetnyak N. G. Issledovanie formirovaniya puchka v uskoritele elektronov s vtorichnoemissionnym istochnikom [Investigation of beam formation in an electron accelerator with a secondary emission source]. *Visnyk "KhNU"* [Bulletin of the Kharkiv National University] Ser.: "Yadra, chastyinki, polya" [Kernels, particles, fields]. Kharkiv, 2006, no 732, 2(30), pp. 96–100.
10. Dovbnya A. N., Zakutin V. V., Lavrinenko S. D. Modifikatsiya poverkhnosti zirkoniya i splava Zr 1%Nb elektronnyim puchkom uskoritelya na osnove magnitronnoy pushki [Modification of the surface of zirconium and alloy Zr 1% Nb electron beam of a magnetron gun accelerator]. *VANT. Ser.: "Fizika radiatsionnogo materialavedeniya"* [Physics of Radiation Materials Science]. 2011, no. 2(72), issue 97, pp. 39–45.
11. Ayzatsky M. I., Dovbnya A. N., Mazmanishvili A. S., Reshetnyak N. G., Romas'ko V. P., Chertishchev I. A. Studies on formation of the radially-directed electron beam generated by the magnetron gun with a secondary emission cathode. *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations"*. 2016, issue 66, no. 3(103), pp. 11–16.
12. Hemming R. V. *Chislennyye metody* [Numerical methods]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 303 p.

Поступила (received) 05.06.2018

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Мазманішвілі Олександр Сергійович (Мазманишвили Александр Сергеевич, Mazmanishvili Oleksandr Serhiyovych)** – доктор фізико-математичних наук, професор, старший науковий співробітник ННЦ ХФТІ, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0373-0626>; e-mail: [mazmanishvili@gmail.com](mailto:mazmanishvili@gmail.com)

**Решетняк Микола Григорійович (Решетняк Николай Григорьевич, Reshetneak Nikolay Grigoriyevych)** – кандидат фізико-математичних наук, доцент, старший науковий співробітник ННЦ ХФТІ, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2345-6789>; e-mail: [nreshetnyak@kipt.kharkov.ua](mailto:nreshetnyak@kipt.kharkov.ua)